第40卷 第2期
2023年2月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 2
Feb. 2023

民勤绿洲外围新月形沙丘宽高比与移动速率变化特征

何晨晨[1,2]， 吴盈盈[1,2]， 田永胜[3]， 马 瑞[3]， 王振亭[1]
（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院，沙漠与沙漠化重点实验室，甘肃 兰州 730000；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：对民勤绿洲外围新月形沙丘形态演变过程和移动规律的认识是当地防风固沙与生态建设的重要前提。本文通过野外实地测量和高分辨率遥感影像分析，探讨民勤绿洲外围上风向边缘区域内新月形沙丘形态参数之间及其与移动速率的关系。结果表明：（1）沙丘宽高比16 a来保持常数值16。（2）高大沙丘年均移动距离小于3 m，属中等移动速度，形态基本保持不变，仅在迎风坡基线、脊线和翼角处变化明显。低矮沙丘移动较快，年均移动距离大于10 m，属极快速移动速度。（3）沙丘顺风向移动速率反比于宽度，比例常数为718.52 $m^2 \cdot a^{-1}$。该区域新月形沙丘以快速移动速度为主，移动速率大于5 $m \cdot a^{-1}$，占比为52.63%。（4）沙粒在迎风坡侵蚀并在背风坡沉积的过程中，大沙丘保持形态稳定，移动缓慢。小沙丘形态变化剧烈，移动快速，沙丘发育有进一步缩小的趋势。

关键词：民勤绿洲；新月形沙丘；几何参数；移动规律

河西走廊毗邻腾格里、巴丹吉林和库姆塔格三大沙漠，饱受风沙危害，对中国北方生态安全屏障建设至关重要。走廊东端的民勤地区已有六十余年治沙历史，虽然取得了举世瞩目的成绩[1]，但是土地荒漠化形势依然严峻。绿洲外围水资源匮乏，风力强劲，极易发生风蚀荒漠化。以呈半环状包围着民勤绿洲的连古城国家级自然保护区为例，其总面积的98.41%属于风蚀荒漠化土地[2]。了解风沙地貌形成与运动规律是科学开展风沙工程设计与施工的重要前提。民勤绿洲外围上风向区域内的风沙地貌以固定和半固定的灌丛沙丘为主，新月形沙丘与沙丘链次之，小型风蚀坑偶有分布。流动沙丘在自身不断移动的同时，亦为其附近的风沙活动提供物质来源，对绿洲存在与发展的现实威胁最大。

在众多沙丘类型中，新月形沙丘的研究程度较高[3]。早期野外观测主要以文字描述为主[4]，其工作量大、耗费时间长、形态特征描述不够准确。后来，插钎法、重复测量和航片分析等传统监测方法得到广泛应用[5-6]。目前，遥感影像、GIS、全站仪、实时动态差分GPS、三维激光扫描仪、无人机倾斜摄影测量等各种先进技术被应用于沙丘形态特征测量[7-9]，为深入探索沙丘形态动力学过程提供了宝贵资料。新月形沙丘的形态参数包括沙丘高度、宽度、迎风坡长度、落沙坡长度、迎风坡坡度、两翼长度、开展度和对称度等[10]。各参数之间的关系包括沙丘宽度与高度、迎风坡坡长与宽度、两翼长度与宽度、落沙坡倾角与高度、底面积与周长或体积等。其中，沙丘宽度和高度之间的关系研究最为广泛。由大量实测数据得出的一个经验关系是沙丘宽度与高度正相关[11]，可用线性关系描述[10-12]。按照新月形沙丘的迎风坡长与宽度的比值，将其形态分为肥的、矮胖的、标准的、苗条的[13-14]。按兽角形态将其分为线性的、串珠状的、打结的[15]。除了形态特征，沙丘的演变过程和移动速率是另一个研究重点。沙丘是风力、沙粒和下垫面三者相互作用的产物[16]，其形态演变和移动速率受沙源丰富程度、风速、风向、地形、植被等多种因素影响，不同地区的风沙运移特征有着不同的表现形式，看似普遍的经验和理论关系往往存在很大的区域差异。

河西走廊绿洲边围2006年与2014—2015年两

收稿日期：2022-09-05； **修订日期：**2022-11-21
基金项目：国家自然科学基金区域创新发展联合基金（U21A2001）；国家自然基金面上项目（41971011）
作者简介：何晨晨（1994-），男，博士研究生，主要从事风沙地貌与风沙工程研究. E-mail: hechenchen22@mails.ucas.ac.cn

个时段的遥感影像显示[2],民勤地区的新月形沙丘移动最快。本研究拟在前人工作的基础上,利用野外实地测量和高分辨率遥感影像分析沙丘形态特征和移动速率,给出民勤绿洲上风向边缘区域内新月形沙丘形态参数之间及其与移动速率的定量关系,探讨该地区多年防风固沙工程的实际效果。本研究不仅直接服务于当地的防风固沙与生态建设,而且对河西走廊其他地区相关工作具有重要参考价值与借鉴意义。

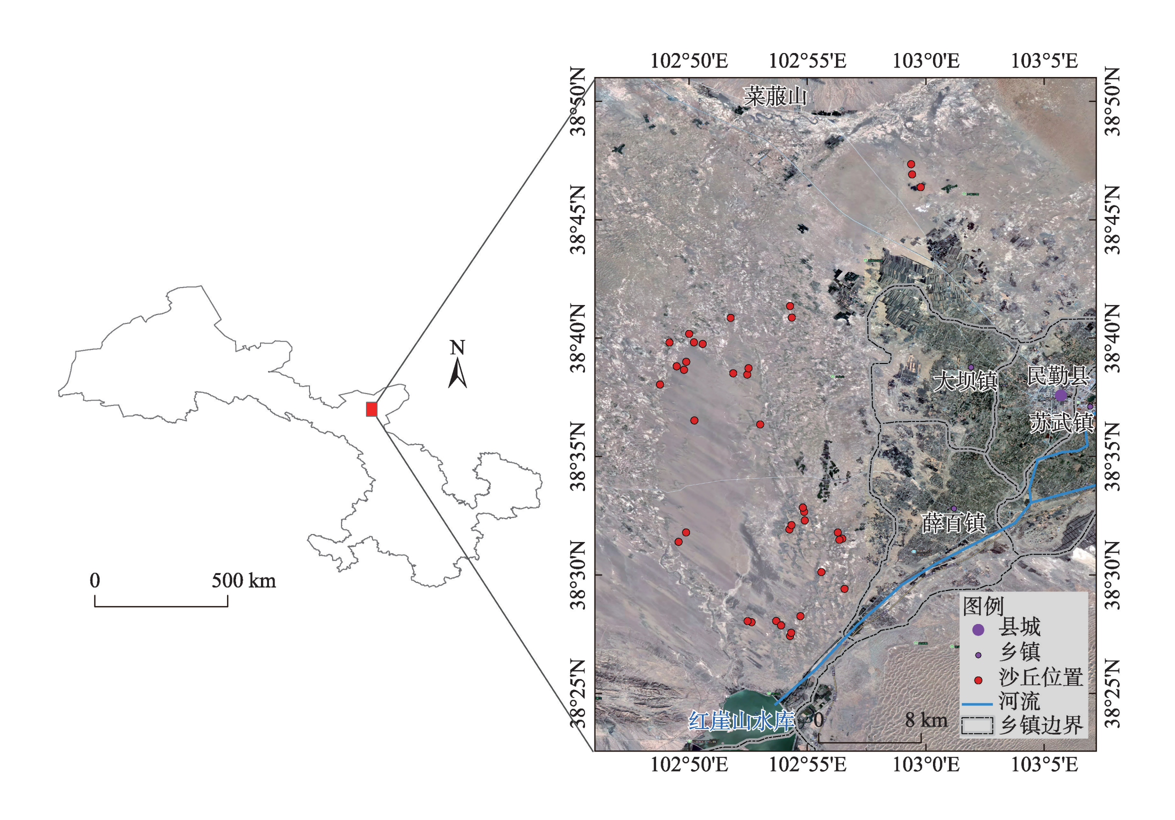
1　数据与方法

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省民勤县城西北约30 km范围内,主体南起红崖山水库北缘,北至莱菔山脚下(102°45′~103°50′E,38°25′~38°50′N),如图1所示。该地区属温带干旱荒漠性气候,常年干燥、降水稀少、蒸发强烈、风大沙多。年均降水量116.2 mm[17],气温7.8 ℃,年内风沙日数139 d,8级以上大风29 d。区域地形平坦,无地表径流,风向单一,植被稀疏,零星分布有梭梭、沙拐枣、灌丛白刺等植物。土地利用类型以沙地为主,林地占一定比例,耕地和草地零星分布。土壤类型以荒漠土为主。风蚀荒漠化土地既有历史时期自然形成[18],也有最近几十年开垦后又弃耕退化。较为开阔的前后滩地是新月形沙丘及沙丘链存在所必须的环境条件,同时,该区位于巴丹吉林沙漠盛行风的下风向,沙源供应较为充足。因此,新月形沙丘及沙丘链是本区的主要沙丘类型[19]。该区域历来是当地防风固沙的重中之重。目前,治沙措施以大面积植树造林和围栏封育为主,已在乡道两侧3~5 km内及绿洲边缘部分地区形成了面积不等的防风固沙人工梭梭林。

1.2　研究方法

1.2.1　沙丘形态参数　野外实地测量和高分遥感影像分析是获取沙丘形态参数的主要方法。新月形沙丘高度和宽度等形态参数利用NTS-352型全站仪直接测得。测量对象主要为形态完整、轮廓显著、相对独立的新月形沙丘。野外测量采用局部坐标系,落沙坡最高点与地面的垂直距离作为沙丘高度;在两翼之间任选一条平行于主风向的直线,两



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)1822号,对底图边界无修改。

图1　研究区示意图

Fig. 1　Map of the research area

个翼角与其水平距离之和即为沙丘宽度。先后两次测量沙丘形态的时间为2006年3月与2022年7月,沙丘个数分别为27和25个。时隔16 a,第一次测量的沙丘[20]大多难以确定其具体位置。相较于上次测量,第二次的空间范围更大,基本覆盖了整个研究区。

1.2.2 遥感影像来源与分析 高分遥感影像数据购自高分辨率对地观测系统甘肃数据与应用中心。其中,2013年11月9日和2014年4月21日影像为高分一号卫星数据,其空间分辨率为2 m;2015年8月21日、2016年5月23日、2017年11月21日、2018年7月21日和2019年10月7日的空间分辨率为0.81 m的高分二号影像;2020年8月5日、2021年8月9日和2022年5月23日为高分六号影像,其空间分辨率2 m。各时段影像预处理包括:遥感影像经正射校正、融合、镶嵌、几何校正。镶嵌处理过程需要注意选择合适的重采样方法,几何校正利用了地面控制点和几何校正数学模型来矫正非系统因素产生的误差。完成以上步骤后,利用ArcGIS软件从中提取流动新月形沙丘底面的轮廓线,最后计算沙丘宽度和底面质心位置。该地区新月形沙丘形态处于不断变化之中,难以选定轮廓线上的某个或某几个特征点代表沙丘位置。因此,以底面质心位置计算其年际移动距离。以遥感影像测量的沙丘主要位于薛百镇和大坝镇以西,仅有3个沙丘位于绿洲北缘的莱菔山下,具体位置见图1。

影像分析采用整体坐标系,具体做法如下:(1)按以直代曲方法量测出每个沙丘底面轮廓处若干点在WGS-84坐标系下的坐标值,计算其在三维直角坐标系下的坐标;(2)利用最小二乘法拟合出包含所有沙丘底面轮廓点的最优平面;(3)在最优平面上任选一点为坐标原点,以主风向为x方向,建立平面直角坐标系,并将所有测量点向该坐标系投影。以投影后的轮廓线计算沙丘宽度与质心位置。其中,确定质心坐标时的底面面积和一阶矩由梯形法计算。因为研究区范围不大且地形非常平坦,这种影像分析方法能够比较准确地提取到沙丘底面轮廓。对于沙丘迎风坡长度和两翼宽度等形态参数,野外实测与遥感影像量测结果之间的相对误差小于5%。

类似于前期探索[20],仍然利用全站仪数据拟合新月形沙丘的形态参数关系。沙丘移动的具体规律则在理论推导基础上,由遥感影像数据最终确定。野外测量的新月形沙丘既有已被人工林固定的,也有完全流动的,遥感影像上量测的则均为流动沙丘。

1.2.3 风况特征 民勤气象站2013—2021年逐小时风速数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),用于风况特征分析。输沙势常用于评估风况特征与潜在输沙强度,其计算公式为[21]:

$$DP = U^2(U - U_t)t$$

式中:DP为输沙势,矢量单位为VU;U和U_t分别为10 m高度的风速和起动风速,U_t取值为6 m·s^{-1};t为起沙风作用的时间,一般用频率表示。风能环境评价包括总输沙势(DP)、合成输沙势(RDP)、合成输沙方向(RDD)和方向变率(RDP/DP)。根据矢量合成法则,对16个方位的输沙势合成得到合成输沙势和合成输沙方向,而合成输沙势与输沙势之比为方向变率。根据输沙势的大小,将风能环境[21]划分为低能($DP<200$)、中能($200 \le DP \le 400$)和高能环境($DP>400$)。根据方向变率,风能环境划分为高变率($RDP/DP<0.3$)、中等变率($0.3 \le RDP/DP \le 0.8$)和低变率($RDP/DP>0.8$)。

2 结果与分析

2.1 风况特征

输沙势是反映一个区域风沙活动强度的重要指标之一[22]。民勤地区2013—2021年输沙玫瑰图如图2所示。年起沙风主要来自于西西北和西北风,历年合成输沙方向介于120°~135°,总体搬运方向为ESE~SE,风况分布为窄单峰型。2013—2021年输沙势依次为40 VU、34 VU、34 VU、26 VU、25 VU、20 VU、20 VU、15 VU和35 VU,年际间输沙势虽有变化,但差异较小,风能环境基本稳定。多年平均输沙势为27.7 VU。根据风能环境划分标准[21],该地区属于低风能环境($DP<200$)。另外,该区域合成输沙势与输沙势呈现出同样的年际变化,变化趋势基本一致。在2013—2020年间呈不断下降趋势,2021年出现上升(图3a)。合成输沙方向和方向变率处于不断波动状态(图3b),多年平均方向变率为0.84,属于低变率,表明该地区风向较为单一。但是,2013年、2014年、2019年方向变率小于0.8,属于中等变率。因此,研究区总体输沙势较小,部分年

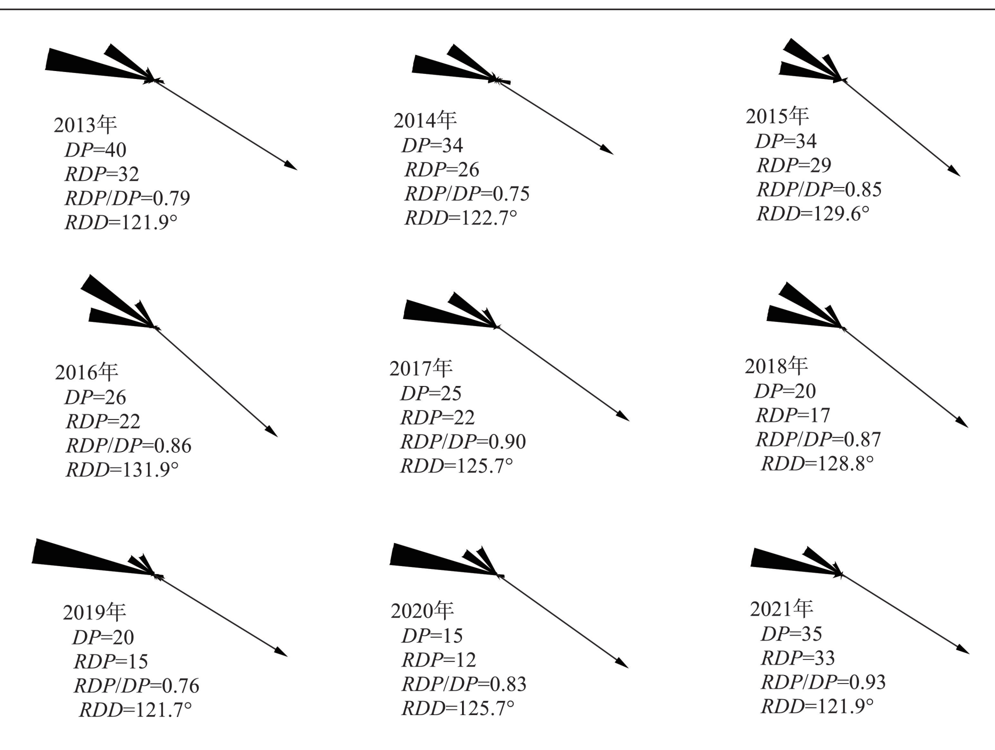


图2　2013—2021年民勤站输沙势玫瑰图

Fig. 2　Rose of drift potential at Minqin station from 2013 to 2021

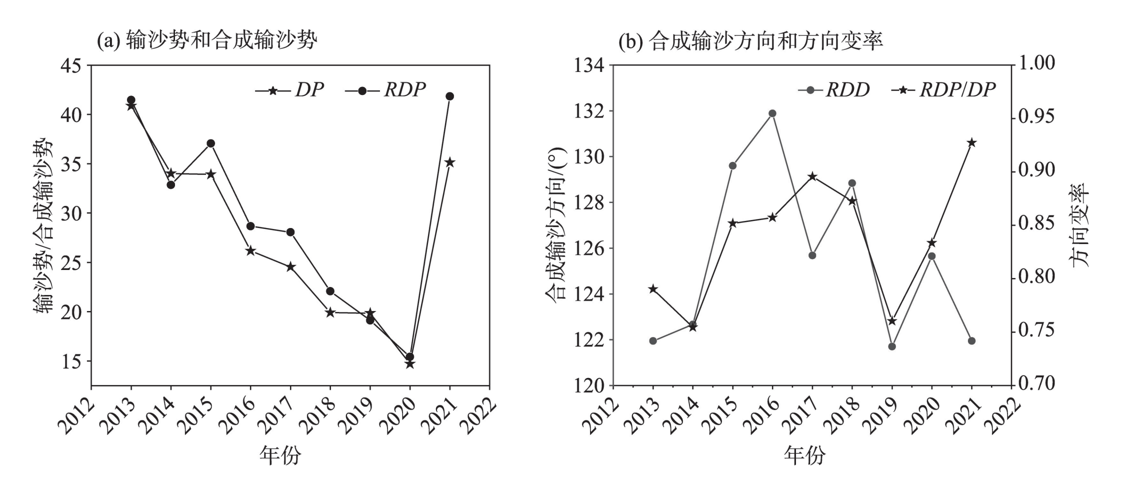


图3　2013—2021年民勤站风能环境变化

Fig. 3　The variations in the wind energy at Minqin station from 2013 to 2021

份风向变化较大,新月形沙丘的移动主要受西西北和西北风的影响。

2.2　高度-宽度关系

新月形沙丘高度与宽度数据可用正比例函数[20]或幂函数[23]拟合。为了方便,进行正比例拟合,结果见图4。总体上看,虽然两次测量时隔16 a,但是形态参数关系基本没有变化,沙丘宽高比约为16。前人大量工作表明其值一般在8~18之间[24],本研究符合这一规律。多年保持常数值,说明宽高比是新月形沙丘的特征参数。沙丘形态特征受风况、沙源和地形等因素影响。对于同一区域,上述风况特征表明多年输沙势变化不大,属于低风能环境。多年平均方向变率属于低变率,风向较为单一。在无人为干扰的情况下,新月形沙丘的参数关系也应无明显变化。

2022年实测数据略显分散,主要原因有二:第一,部分沙丘迎风坡上的人工梭梭林影响了其形态-动力学过程。一般而言,气流在沙丘迎风坡加

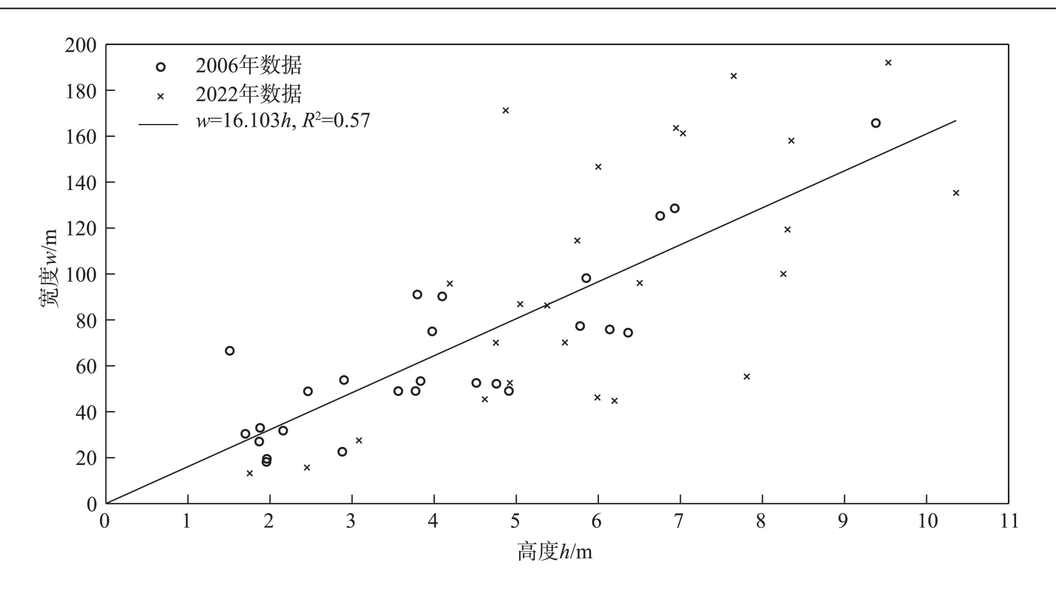


图4 新月形沙丘高度与宽度呈正比例关系

Fig. 4 Proportional relationship between height and width of barchans

速，绕过沙丘顶部在背风坡形成回流，迎风坡气流加速和背风坡回流会影响沙丘的侵蚀速率，从而影响沙丘的宽度、高度等形态参数。对于不同宽高比的沙丘，这一过程也会有所变化。沙丘宽高比越小，气流在迎风坡加速越快，背风坡回流区长度和强度均会增大[25]。地表植被覆盖会引起下垫面粗糙度改变，地表抗风蚀能力增强，从而影响沙丘近地面流场分布。在2022年测量的部分沙丘中，迎风坡存在的人工植被会减弱气流在迎风坡的加速作用，同时沙丘背风坡回流区范围更大。流场的这种变化会使得沙丘高度快速增长，以及背风坡沙尘堆积[26]。植被冠层拦截悬浮在空中的沙尘，使得沙丘上风向沙源供应不足，导致其形态发生变化。同时，迎风坡植被阻挡会使气流向沙丘的两翼绕流，风沙流会将部分沙粒带向沙丘两翼，导致沙丘宽度发生变化。若沙丘两翼附近存在其他沙丘，气流流过沙丘会产生加速效应，这种加速效应会加快两翼的侵蚀速率。

第二，不同区域的风力状况和地表条件略有差别。民勤绿洲外围的新月形沙丘主要分布在前后平坦的砂砾质滩地上。其位于巴丹吉林沙漠的下风向，沙源供应充足。但由于不同区域地表起伏程度有所差异，导致沙丘丘间地不同位置风沙流存在明显差异。不同风力作用下，距离沙源越近，输沙率越大，随着远离沙源，输沙率减小[27]。新月形沙丘近地表风速和输沙率研究显示，由于气流在迎风坡的加速作用，迎风坡风速比来流风速增加25%，沙丘翼角到顶部输沙率增加了1倍，不断增加的输沙率反映风力侵蚀的增加[28]。2022年测量沙丘宽度和高度总体上相较于2006年更大，即2022年多为体积更大的新月形沙丘。沙丘迎风坡气流的加速作用更强，丘顶的风力侵蚀作用更大，沙丘的沙源丰富度和地表条件也更加复杂多样。

2.3 移动速率

2.3.1 *单个沙丘移动轨迹与形态变化* 沙丘的移动速率可以估算沙物质的输移量，为防风固沙实践提供指导。在风力作用下，沙丘往往通过迎风坡侵蚀与背风坡堆积而发生移动。虽然宽高比保持不变，但单个沙丘的形态在移动过程中却是不断变化的。在传统的风沙地貌研究中，往往以轮廓线上某个点或某几个特征点的平均移动距离表示整个沙丘的移动。当形态变化较大时，误差很大。因此，以底面质心标识沙丘位置是更合理的做法。

图5给出了位于102.99°E，38.79°N和102.83°E，38.68°N两个沙丘的底面轮廓在2013—2022年间的变化情况。图5a中沙丘高度为9.3 m，两翼宽度分别为89 m和76 m。以2013年为参考，底面轮廓变化能够反映沙丘详细的年际移动过程。总体上，沙丘形态维持较为完整，侧向位移微小，新月形形状明显。底面质心变化反映出沙丘整体移动缓慢。沙丘年际间的形态变化主要在迎风坡基线、脊线和翼角处比较明显。沙丘迎风坡基线和脊线所代表的

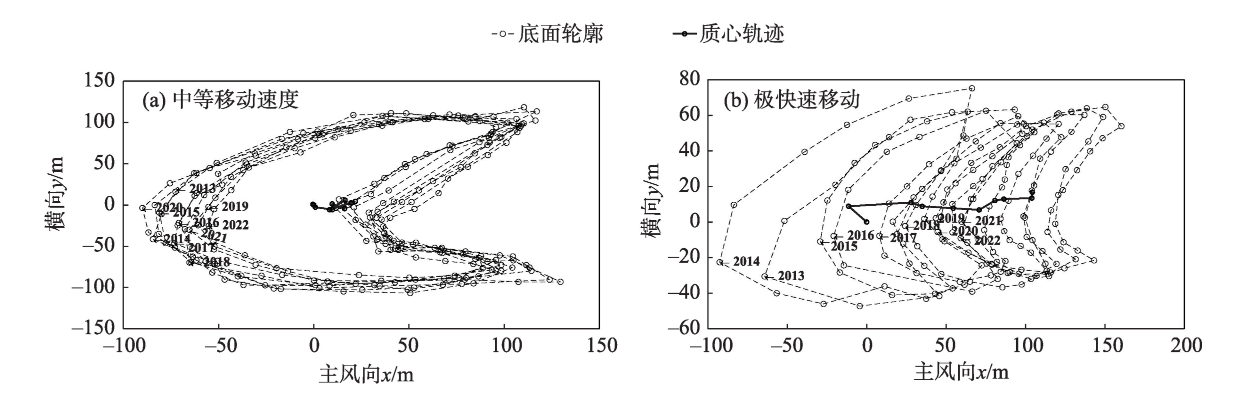


图5　单个沙丘的移动轨迹与形态变化

Fig. 5　Trajectory and morphological variation of individual barchans

沙丘整体上沿主风向移动，但2020年和2021年出现反向移动。沙丘移动方式包含前进式、摇摆式和摆动前进式[29]。当沙源供应不足时，风沙流变为不饱和风沙流，以及常年多个风向的出现会导致新月形沙丘的反向发展。图5b中沙丘的两翼宽度约为60 m和40 m。沙丘的底面轮廓反映出其形态变化很剧烈，各形态参数变化大，沙丘整体沿主风向快速前移。在2013—2022年间，沙丘沿主风向主要做前进式移动，少数年份存在反向移动。在反向风风蚀的作用下，沙丘落沙坡顶部会出现反向堆积和脊线反向移动的现象，从而促进了沙丘的反向发育。根据移动速率，流动沙丘可分为四类[30]：慢速（年平均移动距离＜1 m）、中等速度（年平均移动距离＜1~5 m）、快速（年平均移动距离＜5~10 m）、极快速（年平均移动距离＞10 m以上）。上述高大沙丘年均移动距离小于3 m，属于中等速度；低矮沙丘，沙丘年均移动距离大于10 m以上，属于极快速移动。沙丘移动速率与沙丘的体型有关，体型越大，移动速率越小。

图5中的质心轨迹显示两个沙丘均存在显著的反向移动。而当主风向和次风向大致相反时，才会出现这种运动。常兆丰等[31]对甘肃河西绿洲边缘新月形沙丘分析发现，单一主风向是维持新月形沙丘形态的关键因素，促使沙丘顶点和沙脊线重合；而反向风促使沙丘顶点与沙脊线分离。对民勤沙区风速风向数据的统计分析显示[32]，起沙风主要为春季的西北风，其次为夏季的东南风。反向风除了导致新月形沙丘的这种整体反向移动外，还改变了脊线处的风沙流结构并造成丘顶与脊线相对位置的变化[33]。沙丘移动主要受风速和风向等因素的影响。结合风况分析，研究时段输沙势总体较小，属于低风能环境。单个沙丘移动轨迹反映出沙丘总体向前移动，但2014年沙丘出现明显的反向移动（图5b），2014年方向变率为0.75，属于中等变率，说明风向变化较大，风向多变是沙丘反向移动的重要因素。由于民勤地区常年受西北风控制，东风、东南风较弱，难以完全抵偿西北风产生的作用。即使年内风向变率较大，但年输沙势较小不足以使沙丘发生反向移动。因此，沙丘年际间的反向移动可能是强沙尘暴事件所致。以2007年3月27日一场强沙尘暴为例[34]，在强沙尘暴事件前后，对图5a沙丘监测发现：脊线高度减小（15±5）cm，长度增加（7.00±2.00）m；移动距离（21±5）cm，沙丘体积减小（5.1±2.0）×10^3 m^3。这说明强沙尘暴事件对沙丘的移动速率和形态特征有重要的影响，也是导致沙丘反向移动的重要原因。此外，低矮沙丘底面轮廓的面积随着时间推移不断缩小，这表明在移动过程中体积在减小，沙丘向着缩小的趋势发展。而高大沙丘保持相对稳定，造成这一结果的原因与沙丘自身的体积大小有关。

2.3.2　移动速率与形态参数关系　当沙丘形态和来流情况保持不变时，可由质量守恒定律导出移动速度与沙丘高度成反比的理论关系[35-36]，有时，新月形沙丘在几个月内的总体移动几乎完全由一两场强沙尘暴造成。同时，反向风的存在及遥感影像成像时间的年度差异也为确定沙丘沿主风向的移动速率带来不小困难。为了减少逐年计算带来的不确定性，本文以2013年质心位置为参考点，由2014—2022年间质心移动的最大距离计算9 a间的平均移动速率，沙丘宽度取为10次影像分析的平均值。图

6给出了年移动速率随沙丘宽度的变化情况，沙丘宽度范围在45~300 m，移动速率在1~16 m·a^{-1}。其中，快速移动沙丘占52.63%，极快速移动沙丘占15.79%，中等移动速度沙丘占31.58%。因此，该区域沙丘主要以快速移动沙丘为主，移动速率大于5 m·a^{-1}。

沙丘移动速率与宽度之间建立关系之后，对研究区风况和沙丘宽度的测量就可以快速估计沙丘的移动速率。通过宽度反映沙丘的移动速率大大降低了研究的难度。同一风力条件下，沙丘的移动速率不同。这表明风况对沙丘移动速率的影响被其他因素削弱，导致移动速率差异[37]。前文已证实沙丘宽高比保持常数的经验关系。因此，移动速率应该反比于沙丘宽度。由最小二乘法得到的拟合优度为0.83，比例常数为718.52 m^2·a^{-1}。对沙丘的移动方向[38]、移动距离[39]、移动速率[40]研究发现，新月形沙丘的移动速率与高度、宽度均成反比，与本文结果一致。同时，沙丘移动速率和宽度的比值变化还表明，随着宽度增大，沙丘移动速率的变化趋于平缓。沙丘宽度由50 m增加到150 m，移动速率的变化范围在3~16 m·a^{-1}；而沙丘宽度由200 m增加到300 m，沙丘移动速率的变化范围在2~7 m·a^{-1}。这说明沙丘达到一定的宽度后，移动速率变化的波动范围更小，同一风况下，沙丘更趋于稳定。对独立的新月形沙丘，沙丘宽度与移动速率之间存在的反比关系，可以用不同宽度沙丘之间的沙粒质量差异来解释。沙丘的移动是沙粒从迎风坡侵蚀重新分布到背风坡的过程。宽度更大的沙丘需要更长的时间来重建和平衡这一过程，因此移动速率更慢[41]。这一过程可能导致沙丘在移动过程中形态特征发生变化。沙丘动力学模型研究表明，恒定沙源条件下，在风沙流中不同大小的新月形沙丘可能处于不同的不平衡状态[42]。结合单个沙丘多年移动轨迹的变化以及沙丘移动速率与宽度的关系可知，沙丘宽度不但反映移动速率的快慢，而且由于移动速率之间的差异，不同宽度的沙丘形态向不同方向发育。随着时间推移，宽大沙丘形态基本保持不变或者变大，而窄小沙丘倾向于缩小或者消失。

3 讨论

3.1 风况

风况是影响沙丘形态发育的重要动力因素，风速和风向决定沙丘的高度、宽度、体积和移动速率等。沙丘形态演化和移动不仅受大气环流的控制，同时受局地气流的影响[43]。宏观上，区域风况受大气环流的控制，已有研究对风况和不同类型的沙丘建立联系。窄单峰型与新月形沙丘相联系，双峰型通常与线形沙丘相联系，而复合型则与星状沙丘相联系[44]。在沙源和风向变率均低的地区会形成新月形沙丘，沙源的增加导致新月形沙丘合并成横向沙丘，而风向变率的增加导致双向风环境下线状沙

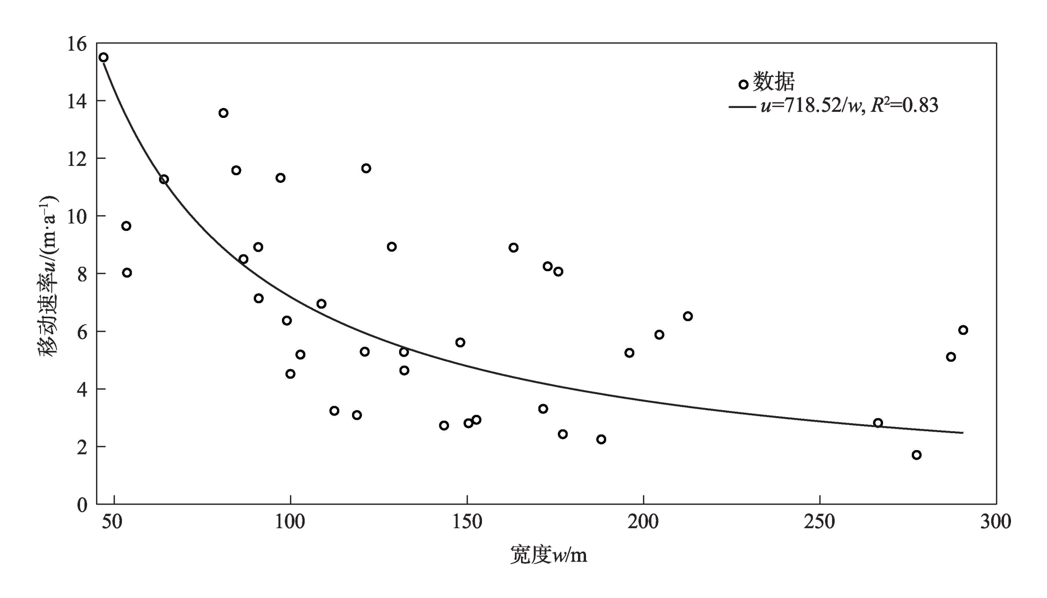


图6 新月形沙丘移动速率反比于宽度

Fig. 6 Inversely-proportional relationship between migration speed and width of barchans

丘的形成。研究区风况特征显示年起沙风主要来自于西西北和西北风,风况分布为窄单峰型,多年风向变率为低变率,风向较为单一,有利于新月形沙丘的形成和演化。因此,沙丘宽高比常年保持常数值(图4)。沙丘不仅对区域风况做出响应,沙丘局部也会产生复杂的二次流动。沙丘背风坡可形成分离流、重附未偏向流、重附偏向流和反向流[45]。沙粒从迎风坡被侵蚀并在背风坡沉积时,沙丘向下风向移动。沙丘移动是风沙量从迎风坡重新分布到背风坡的结果。有研究认为这一过程处于平衡状态,也有认为是非平衡状态。对两个典型沙丘的移动轨迹分析,高大沙丘多年形态维持稳定,移动速率缓慢(图5a)。沙粒被侵蚀后重新分布可以认为是平衡状态。相对低矮沙丘形态变化剧烈,沙丘底面轮廓不断减小反映出沙丘体积在减少(图5b),这表明沙丘在移动过程中侵蚀量大于堆积量,使得沙丘不断缩小,移动过程可以认为是非平衡状态,沙丘最终可能会缩小或者消失。因此,区域大气环流和沙丘局部产生的二次流动共同塑造沙丘的形态,影响沙丘移动。

3.2 植被

随着民勤绿洲防风固沙工程的实施[1],沙面固定限制了风沙流的沙源供应,改变了地表下垫面的性质。防沙固沙工程主要是通过植物(或生物)措施、机械措施、化学措施等降低沙源供应、改变下垫面性质达到阻沙、固沙和输沙的目的。主要影响因素包括沙粒粒度变化、水分含量、粘合剂、植被种类、植物结构、形态和密度,以及其他表面粗糙度。植被作为沙源供给和风沙运输的主要限制因素,本研究区人工植被是影响沙丘形态和移动的主要因素,是沙丘宽高比分散的原因之一。沙生植物具有发达的根系,能固结周围的沙粒,植被腐烂后有利于有机质的聚集,促进沙的成土作用和固定,同时改变土壤化学性质[46-47]和粒度分布[48];同时植物冠层能降低近地表风沙运输的有效性。对裸露沙丘和植被覆盖沙丘监测发现[49],植被覆盖沙丘的移动速率与高度的相关性比裸露沙丘更差。与裸露沙丘相比,固定沙丘的两翼、迎风坡、背风坡、丘顶的移动速度存在差异。植被盖度增加,地表输沙能力和沙源供应受到限制,新月形沙丘会逐渐向抛物线形沙丘转变[50]。地表植被覆盖率仅为15%时,大部分沙粒运输得到抑制[51]。植物冠层对风沙流的影响取决于植物密度、形状或形态、分布和高度[52],群落高大、枝叶密集的植物种固沙能力更强。对不同类型植被覆盖下沙丘表面沉积物粒度分析[53],地表沉积物细组分含量与植物冠幅、枝高和分枝数成正相关。在低密度的情况下,单个灌木形成的湍流和涡旋脱落又加强了地表的风沙侵蚀[54]。植物高度增加,导致沙丘高度增加,沙丘长度减少[55]。研究区流动沙丘各参数间表现出良好的相关性,沙丘体积越大,移动速率越慢。同时移动速率反比于沙丘宽度(图6),沙丘总体上向东南方向移动,这些结论与前人研究基本一致[56]。不同之处在于部分新月形沙丘存在人工梭梭林,导致参数间的相关性有所减弱,沙丘宽高比分散。植被对沙丘形态特征和移动速率[57]、近地面流场[58-59]、沙丘表层粒度分布[60]等方面影响深远。植被可以增加地表粗糙度,拦截气流中携带的沙物质,影响沙粒在植物附近沉积[61]。同时,植物削弱了近地面风速,减少被吹扬搬运沙粒的数量,这都会导致沙源供应不足,从而影响沙丘的形态。

4 结 论

通过野外实地测量与高分遥感影像分析方法,探讨了民勤绿洲外围上风向区域内人工林固定和完全流动性新月形沙丘的形态特征与移动速率,本文得出以下几点结论:

(1) 2006—2022年间,沙丘宽高比保持常数值16。2022年沙丘宽高比数据分散的原因,一是部分沙丘迎风坡上的人工梭梭林影响了其形态-动力学过程;二是测量的不同区域风力状况和地表条件不同。大沙丘迎风坡气流的加速作用更强,丘顶的风力侵蚀作用更大,沙丘的沙源丰富度和地表条件也更加复杂多样。

(2) 高大沙丘年移动速度缓慢,年均移动距离小于3 m,属于中等移动速度,其形态基本保持不变;低矮沙丘快速移动,年均移动距离大于10 m,属于极快速移动速度。

(3) 沙丘顺风向的年移动速率反比于其宽度,比例常数为718.52 $m^2 \cdot a^{-1}$。该区域内快速移动沙丘占52.63%,极快速占15.79%,中等移动速度占31.58%。

(4) 大沙丘多年形状维持稳定,沙粒在迎风坡

侵蚀并在背风坡沉积的过程相对稳定，沙丘移动缓慢。小沙丘形态变化剧烈，移动快速，移动过程中沙丘发育有进一步减小的趋势。

致谢：西南交通大学沈亚萍和兰州大学邵文彦提供了部分数据，谨致谢忱。

参考文献(References)：

[1] 徐先英. 甘肃治沙研究60年回顾与展望[J]. 甘肃林业, 2019, 35(4): 9−21. [Xu Xianying. Review and prospect of 60 years of sand control research in Gansu[J]. Gansu Forestry, 2019, 35(4): 9−21.]

[2] 马静, 单立山, 孙学刚, 等. 甘肃民勤连古城国家级自然保护区土地荒漠化特征分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(3): 99−107. [Ma Jing, Shan Lishan, Sun Xuegang, et al. Analysis of land desertification characteristics in Liangucheng National Nature Reserve in Minqin, Gansu province[J]. Journal of Gansu Agriculture University, 2019, 54(3): 99−107.]

[3] 李志忠, 周勇, 罗若愚. 风沙地貌研究的若干新进展[J]. 干旱区研究, 1999, 16(2): 61−66. [Li Zhizhong, Zhou Yong, Luo Ruoyu. Recent advances in aeolian geomorphology[J]. Arid Zone Research, 1999, 16(2): 61−66.]

[4] 王萌, 郜学敏, 屈欣, 等. 柴达木盆地西南缘山前沙丘区沙丘地貌形态特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 166−174. [Wang Meng, Gao Xuemin, Qu Xin, et al. Morphological characteristics of dunes in the piedmont of southwestern Qaidam Basin, China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 166−174.]

[5] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1−316. [Wu Zheng. Blown-Sand Geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987: 1−316.]

[6] 蔡东旭, 李生宇, 雷加强, 等. 新月形沙丘对湖积平原风蚀荒漠化的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1496−1504. [Cai Dongxu, Li Shengyu, Lei Jiaqiang, et al. Effect of barchan dune on surface wind erosion over lacustrine plain[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1496−1504.]

[7] 王静璞, 刘连友, 沈玲玲. 基于Google Earth的毛乌素沙地新月形沙丘移动规律研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 1094−1100. [Wang Jingpu, Liu Lianyou, Shen Lingling. Research of the barchan dunes movement in the mu Us sandy land on Google Earth Software[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(6): 1094−1100.]

[8] 陈芳, 刘勇. 巴丹吉林沙漠典型地域沙丘多年变化的遥感动态分析[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 501−507. [Chen Fang, Liu Yong. Secular annual movement of sand dunes in Badain Jaran desert based on geographic analyses of remotely sensed imagery[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(4): 501−507.]

[9] 李爱敏, 韩致文, 钟帅, 等. 基于CASS和ArcGIS的新月形沙丘属性参数提取[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 484−491. [Li Aimin, Han Zhiwen, Zhong Shuai, et al. Attributive parameter extraction of the barchan dune based on CASS and ArcGIS[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3): 484−491.]

[10] 王训明, 董治宝, 屈建军. 塔克拉玛干沙漠简单横向沙丘形态学示量特征[J]. 兰州大学学报, 2002, 38(6): 110−116. [Wang Xunming, Dong Zhibao, Qu Jianjun. Morphologic parameters of the simple transverse dunes in Taklimakan Desert[J]. Journal of Lanzhou University, 2002, 38(6): 110−116.]

[11] Finkel H J. The barchans of southern Peru[J]. The Journal of Geology, 1959, 67(6): 614−647.

[12] Hesp P A, Hastings K. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 193−204.

[13] Long J T, Sharp R P. Barchan-dune movement in imperial valley, California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1964, 75(2): 149−156.

[14] Hamdan M A, Refaat A A, Wahed M A. Morphologic characteristics and migration rate assessment of barchan dunes in the Southeastern Western Desert of Egypt[J]. Geomorphology, 2016, 257: 57−74.

[15] Bourke M C. Barchan dune asymmetry: Observations from mars and earth[J]. Icarus, 2010, 205(1): 183−197.

[16] 周德刚, 黄刚, 马耀明. 中国西北干旱区戈壁下垫面夏季的热力输送[J]. 大气科学学报. 2012, 35(5): 541−549. [Zhou Degang, Huang Gang, Ma Yaoming. Summer heat transfer over a Gobi underlying surface in the arid region of Northwest China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(5): 541−549.]

[17] 刘虎俊, 王继和, 李毅, 等. 塑料网方格沙障对新月形沙丘迎风坡的风沙流影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 26−34. [Liu Hujun, Wang Jihe, Li Yi, et al. Effects of plastic checkerboard sand-barrier on wind-sand flux of leeward of crescentic dune[J]. Journal of Water and Soil Conservation, 2011, 25(5): 26−34.]

[18] 李并成. 残存在民勤县西沙窝中的古代遗址[J]. 中国沙漠, 1990, 10(2): 35−42. [Li Bingcheng. Investigation on the ancient ruins in the western sandy land of Minqin county[J]. Journal of Desert Research, 1990, 10(2): 35−42.]

[19] 张云枫, 马义娟, 苏志珠, 等. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠连接带沙丘移动规律[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 82−91. [Zhang Yunfeng, Ma Yijuan, Su Zhizhu, et al. Dune movement in the joint zone of the Badain Jaran desert and Tengger desert[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(5): 82−91.]

[20] Wang Z T, Tao S C, Xie Y W, et al. Barchans of Minqin: Morphometry[J]. Geomorphology, 2007, 89(3−4): 405−411.

[21] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime[J]. A Study of Global Sand Seas, 1979, 1052: 137−169.

[22] 王兆云, 牛改红, 柳本立. 风沙活动强度3种估算指标对比及适用性分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 118−126. [Wang Zhaoyun, Niu Gaihong, Liu Benli. Applicability of three indexes for estimat-

ing the intensity of blown-sand activity[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 118-126.]

[23] 钱广强, 杨转玲, 董治宝, 等. 基于多旋翼无人机倾斜摄影测量的沙丘三维形态研究[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 18-25. [Qian Guangqiang, Yang Zhuanling, Dong Zhibao, et al. Three-dimensional morphological characteristics of barchan dunes based on photogrammetry with a multi-rotor UAV[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 18-25.]

[24] 杨岩岩, 刘连友, 屈志强, 等. 新月形沙丘研究进展[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 76-83. [Yang Yanyan, Liu Lianyou, Qu Zhiqiang, et al. A review of barchan dunes[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(1): 76-83.]

[25] 王硕, 凡凤仙, 张盟盟, 等. 基于OpenFOAM的正弦形沙丘表面流场特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(4): 313-319. [Wang Shuo, Fan Fengxian, Zhang Mengmeng, et al. Flow behavior over a sinusoidal dune based on OpenFOAM[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2017, 39(4): 313-319.]

[26] 张春来, 杨焱, 黄晓琪, 等. 栅栏沙丘表面流场的二维数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(1): 15-23. [Zhang Chunlai, Yang Yan, Huang Xiaoqi, et al. Two-dimensional numerical simulation of the airflow field on a sand dune with fence [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(1): 15-23.]

[27] 李得禄, 满多清, 朱国庆, 等. 丘间低地不同部位风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1210-1215. [Li Delu, Man Duoqing, Zhu Guoqing, et al. Aeolian-sand flow structure characteristics at different positions in inter-dune lowland[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1210-1215.]

[28] Weaver C M, Wiggs G F S. Field measurements of mean and turbulent airflow over a barchan sand dune[J]. Geomorphology, 2011, 128(1-2): 32-41.

[29] 韩福贵, 仲生年, 常兆丰. 民勤沙区沙丘的基本特征及其移动规律研究[J]. 防护林科技, 2005(3): 4-6. [Han Fugui, Zhong Shengnian, Chang Zhaofeng. Basic characteristics of dune and its moving rules in desert area in Minqin[J]. Protection Forest Science and Technology, 2005(3): 4-6.]

[30] 朱震达, 陈治平, 吴正. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[J]. 科学通报, 1966, 17(13): 620-624. [Zhu Zhenda, Chen Zhiping, Wu Zheng. Study on aeolian geomorphology of Taklamakan desert[J]. Chinese Science Bulletin, 1966, 17(13): 620-624.]

[31] 常兆丰, 李亚, 张剑挥, 等. 新月形沙丘稳定性机理——以甘肃河西沙区为例[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4375-4383. [Chang Zhaofeng, Li Ya, Zhang Jianhui, et al. Stability mechanisms of barchan sand dunes : A case study in the Hexi Desert in Gansu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4375-4383.]

[32] 常兆丰, 马中华, 朱淑娟, 等. 新月形沙丘顶点与沙脊线重合和分离的两种过程——以甘肃河西走廊沙区为例[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 167-173. [Chang Zhaofeng, Ma Zhonghua, Zhu Shujuan, et al. Processes of superposition and separation of barchan dunes on the top and ridge line: A case study in the desert areas of the Hexi Corridor, Gansu province[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 167-173.]

[33] 刘旭阳, 宁文晓, 王振亭. 新月形沙丘脊线处的风沙流结构[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 76-82. [Liu Xuyang, Ning Wenxiao, Wang Zhenting. Aeolian sand structure at the brink of barchans [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(6): 76-82.]

[34] Wang Z T, Zhang J W, Zhang Q H, et al. Barchans of Minqin: sediment transport[J]. Geomorphology, 2008, 96(1-2): 233-238.

[35] 石学刚, 李广, 刘世增, 等. 河西走廊绿洲边缘新月形沙丘的动态变化及其与气象因子的关系[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(2): 86-93. [Shi Xuegang, Li Guang, Liu Shizeng, et al. Dynamic changes of barchan dunes and its relationship with meteorological factors along oasis fringe in Hexi Cooridor[J]. Journal of Gansu Agriculture University, 2018, 53(2): 86-93.]

[36] Ning W X, Liu X Y, Wang Z T. An analytical model for the growth and migration of a transverse dune[J]. The European Physical Journal E, 2019, 42(4): 1-7.

[37] 赛亚热·赛都拉, 毛东雷, 徐佳瑞, 等. 库姆塔格沙漠西缘风况特征及沙丘运移规律[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 62-68. [Saidoula Saiyare, Mao Donglei, Xu Jiarui, et al. Characteristics of wind conditions and dune movement rules on the west edge of Kumtag desert, China[J], Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 62-68.]

[38] 李爱敏, 韩致文. 新月形沙丘形态参数与移动速度的关系[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 29-40. [Li Aimin, Han Zhiwen. Relationship between moving speed and morphological parameters of barchan dunes[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 29-40.]

[39] 郭建英, 董智, 李锦荣, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸沙丘形态及其运移特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 40-44. [Guo Jianying, Dong Zhi, Li Jinrong, et al. Dune morphology and migration characteristics in the Ulanbuh desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 40-44.]

[40] 李建军, 焦菊英, 曹雪, 等. 柴达木盆地沙丘移动的空间分异及对形态参数的响应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 309-313. [Li Jianjun, Jiao Juying, Cao Xue, et al. Spatial regionalization and response to morphological parameters of dune migration in the Qaidam Basin of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 309-313.]

[41] Elbelrhiti H, Claudin P, Andreotti B. Field evidence for surface-wave- induced instability of sand dunes[J]. Nature, 2005, 437 (7059): 720-723.

[42] Hersen P, Andersen K H, Elbelrhiti H, et al. Corridors of barchan dunes: Stability and size selection[J]. Physical Review E, 2004, 69 (1): 011304.

[43] 张正偲, 董治宝. 风沙地貌形态动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 734-747. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. Research progress on aeolian geomorphology and morphodynamics

[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 734−747.]

[44] Wasson R J, Hyde R. Factors determining desert dune type[J]. Nature, 1983, 304(5924): 337−339.

[45] Sweet M L, Kocurek G. An empirical model of aeolian dune lee-face airflow[J]. Sedimentology, 1990, 37(6): 1023−1038.

[46] 李浙华, 李生宇, 李丙文, 等. 不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 160−167. [Li Zhehua, Li Shengyu, Li Bingwen, et al. Spatial variation of soil chemical properties of longitudinal dunes with different vegetation coverage levels[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 160−167.]

[47] 赵晨光, 李慧瑛, 鱼腾飞, 等. 腾格里沙漠东北缘人工植被对土壤物理性质的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1112−1121. [Zhao Chenguang, Li Huiying, Yu Tengfei, et al. Effects of artificial vegetation construction on soil physical properties in the northeastern edge of Tengger Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1112−1121.]

[48] 赵鹏, 朱淑娟, 段晓峰, 等. 民勤绿洲边缘阻沙带表层土壤粒度空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1335−1345. [Zhao Peng, Zhu Shujuan, Duan Xiaofeng, et al. Spatial distribution characteristics of grain size of surface soil in the sand-resitant belt of Minqin Oasis marginal[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1335−1345.]

[49] 许明静, 吕萍, 肖南, 等. 毛乌素沙地西北部植被覆盖对沙丘移动的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 71−80. [Xu Mingjing, Lyu Ping, Xiao Nan, et al. Effect of vegetation cover on dune migration in northwest Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(4): 71−80.]

[50] Lancaster N, Baas A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California[J]. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group, 1998, 23(1): 69−82.

[51] Hesp P. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics[J]. Geomorphology, 2002, 48(1−3): 245−268.

[52] 高永, 丁延龙, 汪季, 等. 不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 135−142. [Gao Yong, Ding Yanlong, Wang Ji, et al. Sediments particle size changes and its sand fixation ability for different shrub dunes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 135−142.]

[53] 姜吴彬, 张德国, 杨小平. 沙丘形态及表沙粒度特征对风况和地表植被变化的响应[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 120−129. [Jiang Wubin, Zhang Deguo, Yang Xiaoping. Response of dune morphology and grain-size characteristics to the change of wind regimes and vegetation cover[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 120−129.]

[54] Hesp P A. The formation of shadow dunes[J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51(1): 101−112.

[55] Van Dijk P M, Arens S M, Van Boxel J H. Aeolian processes across transverse dunes. II: Modelling the sediment transport and profile development[J]. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 1999, 24(4): 319−333.

[56] Ding C, Zhang L, Liao M, et al. Quantifying the spatio-temporal patterns of dune migration near Minqin Oasis in northwestern China with time series of Landsat−8 and Sentinel−2 observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 236: 111498.

[57] Yang Z, Qian G, Dong Z, et al. Migration of barchan dunes and factors that influence migration in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Sand Sea, China[J]. Geomorphology, 2021, 378: 107615.

[58] Qian G, Yang Z, Tian M, et al. From dome dune to barchan dune: Airflow structure changes measured with particle image velocimetry in a wind tunnel[J]. Geomorphology, 2021, 382: 107681.

[59] Bristow N R, Blois G, Best J L, et al. Unsteady dynamics of turbulent flow in the wakes of barchan dunes modulated by overlying boundary-layer structure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 920: 1−39.

[60] 苏松领, 毛东雷, 蔡富艳. 新疆策勒沙漠与砾质戈壁新月形沙丘表面沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8): 124−132. [Su Songling, Mao Donglei, Cai Fuyan. Grain-size characteristics and sedimentary environment of sediments on the surfaces of crescent-shaped dunes in the desert and gravel Gobi in Cele, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(8): 124−132.]

[61] 刘金苗, 李菊艳, 尹忠东, 等. 干枯骆驼刺对风沙流场影响的数值模拟研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1514−1525. [Liu Jinmiao, Li Juyan, Yi Zhongdong, et al. Numerical simulation study on the influence of dry Alhagi camelorum on the wind-sand flow field[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1514−1525.]

Variation characteristics of width-height ratio and migration speed of barchans at the margin of Minqin oasis

HE Chenchen[1,2], WU Yingying[1,2], TIAN Yongsheng[3], MA Rui[3], WANG Zhenting[1]

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The understanding of the evolution process of barchan dune and its movement rate is an important prerequisite for wind prevention and sand fixation and ecological construction in Minqin oasis. Based on field measurement and high-resolution remote sensing image analysis, The study discusses the relationship between the morphological parameters of barchan dune and its movement rate in the upwind edge of Minqin oasis. The results show that: (1) The aspect ratio of the dunes remains a constant value of 16 in 16 years. (2) The average annual moving distance of the tall dune is less than 3 m, which is a medium moving speed. The shape of the tall dune is basically unchanged, and the change is obvious only at the baseline, ridge line, and wing Angle of the windward slope. Low dunes move fast, with an average annual distance of more than 10 m, which is an extremely fast-moving speed. (3) The downwind velocity of the dune is inversely proportional to its width, and the proportionality constant is 718.52 $m^2 \cdot a^{-1}$. In this area, the barchan dune is dominated by fast-moving speed, which is greater than 5 $m \cdot a^{-1}$, accounting for 52.63%. (4) During the process of sand erosion on the windward slope and deposition on the leeward slope, large dunes maintain stable morphology and move slowly. Small dunes change dramatically and move rapidly, and the dunes tend to shrink in development.

Keywords: Minqin oasis; barchan; geometric parameters; migration speed